

Validierung eines analytischen Modells zur Schallausbreitung durch eine Fanstufe

Juliane Pilgrim¹, Maximilian Behn¹, Ulf Tapken¹

¹ DLR, Institut für Antriebstechnik, Abteilung Triebwerksakustik, 10623 Berlin, Deutschland, Email: maximilian.behn@dlr.de

Einleitung

Die Bekämpfung von Fluglärm als Gesundheitsrisiko und Ursache für die Verminderung von Lebensqualität ist ein wichtiges Forschungsgebiet in der Akustik und von hoher gesellschaftlicher Relevanz. Eine der wichtigsten Lärmquellen moderner Triebwerke stellen die aerodynamischen Interaktionen der Rotoren und Statoren der Turbomaschinenkomponenten dar. Ihre effektive Schallabstrahlung aus dem Triebwerkseinlauf wird wesentlich durch die geometrische Gestaltung des Fans beeinflusst, z.B. durch die Zahl, die Sehnenlänge und den Anstellwinkel der Rotorschaukeln [8].

Seit den 1970er Jahren wurden zahlreiche Modelle entwickelt, welche die Ausbreitung von Schallwellen durch Schaufelreihen beschreiben. Diese sind ein wichtiges Werkzeug, um in der Vorauslegung von Triebwerken akustisch günstige Designs zu wählen. Zur Validierung eines solchen Modells wurde im Rahmen einer Messkampagne die Ausbreitung akustischer Moden durch eine Rotor-Stator-Stufe am DLR-Versuchsstand CRAFT (Co-/Counter Rotating Acoustic Fan Test Rig, [2]) experimentell untersucht [1]. Zur Nachbildung des Experiments wurden drei analytische Modelle kombiniert, welche (i) den Einfluss der Schaufeln, (ii) den Einfluss der Strömungsumlenkung sowie (iii) den Einfluss des Fan-Spinners auf die Schallausbreitung beschreiben. Anhand ausgewählter Testfälle werden wichtige Schallausbreitungseffekte und die Genauigkeit der Modellvorhersage diskutiert.

Validierungsdaten aus Experiment

Ausgewählte Moden wurden gezielt mithilfe eines Lautsprecherarrays im Austrittskanal angeregt und stromauf in Richtung Fan abgestrahlt. Das austrittseitige Schallfeld, welches sich aus den abgestrahlten sowie am Fan reflektierten Anteilen zusammensetzt, sowie das in die Einlaufsektion durch den Fan transmittierte Schallfeld wurden durch Mikrofonarrays vor und hinter der Fanstufe abgetastet (siehe Abb. 1).

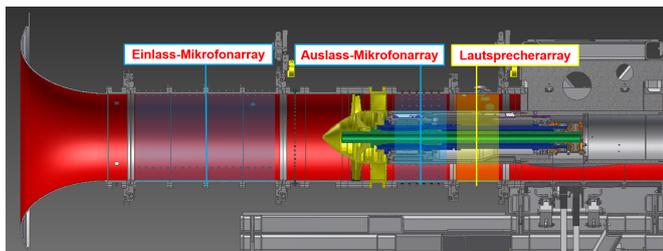


Abbildung 1: Skizze des DLR-Fanversuchsstands CRAFT

Die einzelnen Modenamplituden werden im Post-Processing durch ein kombiniertes Modensynthese- und

Modenanalyseverfahren bestimmt, was die Untersuchung der Transmission, Reflexion sowie azimuthaler, radialer und Frequenzstreuung ermöglicht, siehe Behn et al [1].

Modellierung der Schallausbreitung durch eine Fanstufe

Einfluss der Schaufelreihe

Zur Modellierung des Schalldurchgangs durch die Schaufelreihen von Rotor und Stator wird das 2D-Kaskadenmodell von Smith [3] genutzt, in dem die Schaufeln als unendlich dünne, regelmäßig angeordnete Platten angenommen werden. Smith modelliert den Einfluss der Platten durch eine endliche Anzahl Wirbelquellen mit der Wirbelstärke γ . Das Eintreffen einer Schallwelle induziert eine zu den Platten normale Schnelle, die als *upwash velocity* \mathbf{u} bezeichnet wird. Damit die Randbedingung der Undurchlässigkeit der Platten für Masse und Energie erfüllt ist, muss die Verteilung der Wirbelstärken γ so bestimmt werden, dass die *upwash velocities* verschwinden. Dafür wird durch Integration über die Plattenlänge und anschließende Summation über alle Platten die *Upwash Integral Equation*

$$\mathbf{u} = \mathbf{K}\gamma \quad (1)$$

gebildet, wobei \mathbf{K} als Kernmatrix bezeichnet wird. Durch die numerische Lösung dieses linearen Gleichungssystems werden die Wirbelstärken bestimmt. Die Wirbelquellen regen die gesuchten Schallwellen an, deren Amplituden $A_{mn,Smith}^{\pm}$ aus den ermittelten Wirbelstärken bestimmt werden [4]. Die Reflexions- und Transmissionsfaktoren berechnen sich dann z.B. für den Einfall stromauf laufender Moden in eine Schaufelreihe aus:

$$t = \frac{|A_{mn,Smith}^{-} + A_{mn,ein}^{-}|}{|A_{mn,ein}^{-}|}, \quad (2)$$

$$r = \frac{|A_{mn,Smith}^{+}|}{|A_{mn,ein}^{-}|}. \quad (3)$$

Hierbei sind stromab und stromauf laufende Moden durch + bzw. – gekennzeichnet. m und n bezeichnen die azimuthale bzw. radiale Ordnung der Moden.

Das Modell bildet auch das Auftreten von Modenstreuung ab [4, 5]. Um die Ergebnisse in den dreidimensionalen Raum zu überführen, wird das Modell am sog. *Coustic Radius* ausgewertet, an welchem die Wellenzahlen in 2D und 3D übereinstimmen [4]. Mit diesem Ansatz kann jedoch keine radiale Streuung betrachtet werden.

Einfluss der Strömungsumlenkung

Das Kaskadenmodell geht von einer axialen Ausrichtung der Platten und somit von unbelasteten Schaufeln aus. Um den Einfluss der Strömungsumlenkung durch die Schaufeln sowie der Änderung der Kanalgeometrie auf die akustischen Moden zu erfassen, wird das Impe-

danzsprungmodell von Behn et al [8] herangezogen. Es nutzt die Erhaltung der Energie und Masse zur Bestimmung der transmittierten und reflektierten Modenamplituden aufgrund der Änderung der Schallfeldimpedanz des Kanals. Die Position des Impedanzsprungs an Rotor und Stator wird hierbei wie von D. B. Hanson [6] vorgeschlagen an der Rotor-Vorderkante und der Stator-Hinterkante angenommen (siehe Abb. 2).

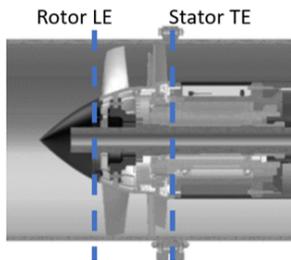


Abbildung 2: Das Impedanzsprungmodell bezieht sich auf Rotor-Vorderkante (LE) und Stator-Hinterkante (TE) und nähert die akustische Wirkung der Strömungsfeldänderung an.

Schalltransmission über den Spinner

Der Einfluss der kontinuierlichen Querschnittsänderung des Kanals aufgrund des Spinners wird als *Slowly Varying Duct* nach Rienstra [7] modelliert. Dafür wird der Kanal in diskrete Abschnitte mit axialer Länge Δx unterteilt und das Produkt der Transmissionsfaktoren aller Bereiche gebildet.

Für inkompressible Strömung ergibt sich für die gegebene Fan-Geometrie, dass der Einfluss der Querschnittsänderung auf die transmittierte Schalleistung ausbreitungsfähiger Moden vernachlässigbar ist. Bei Summation der Teilreflexionen jedes Segments zeigt sich der Einfluss des Spinners auf die reflektierte Schalleistung jedoch als signifikant und näherungsweise äquivalent zum Einfluss eines diskreten Querschnittsprungs.

Zu beachten ist allerdings, dass durch die Querschnittsänderung auch starke Streuungen der radialen Modenordnungen auftreten, welche von dem Modell nicht abgebildet werden.

Ausgewählte Messdaten

Der untersuchte CRAFT-Fan hat 18 Rotor- und 21 Stator-Schaufeln und weist ein Nabenvhältnis von 0.613 auf. Da radiale Streuung im gewählten Ansatz zur Auswertung des Modells vernachlässigt wird, ist in den abgebildeten Messdaten für jede azimuthale Ordnung die Summe der Schalleistungen der radialen Ordnungen dargestellt. Abgebildet sind Ergebnisse für die Fan-Drehzahl 2250 rpm und Lieferzahl 0.28. Die Lieferzahl beschreibt den Strömungsdurchsatz durch den Fan und ist definiert als $\phi = \frac{4\dot{V}}{\pi D^2 U_{tip}}$, wobei \dot{V} den Volumenstrom, D den Kanalinnendurchmesser und U_{tip} die Blattspitzengeschwindigkeit beschreibt.

Es wurden Moden im Frequenzbereich 600 bis 3550 Hz angeregt. Die Erzeugung erfolgte synchron mit dem Wellentrigger um den Effekt von Drehzahlschwankungen zu eliminieren.

Direkte Transmission und Reflexion

Die experimentell und durch die Modellierung bestimmten Reflexions- und Transmissionsgrade sind definiert als

$$\Delta PWL_{refl} = PWL_{Auslass}^+ - PWL_{Auslass}^- \quad (4)$$

$$\Delta PWL_{trans} = PWL_{Einlass}^- - PWL_{Auslass}^- \quad (5)$$

wobei PWL den Schalleistungspegel bezeichnet.

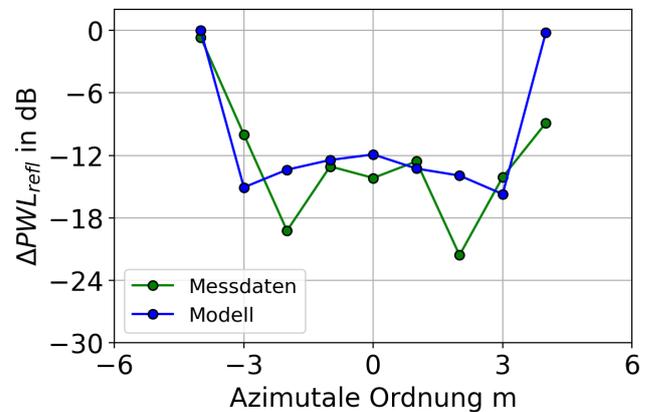


Abbildung 3: Reflexionsgrad über die azimuthale Ordnung für Betriebspunkt 2250 rpm, $\phi = 0.28$, 1230 Hz, $n = 0$

In Abbildung 3 sind die Reflexionsgrade der separat in Einzelmessungen angeregten azimuthalen Ordnungen sowie die modellierten Reflexionsgrade dargestellt. Am Verlauf der gemessenen Reflexion ist zu erkennen, dass Moden betragsmäßig hoher azimuthaler Ordnung, die nahe ihrer Cut-Off-Grenze sind, besonders stark reflektiert werden.

Außerdem ist eine Asymmetrie in der Reflexion bezüglich der azimuthalen Modenordnung deutlich. Negative Ordnungen, welche mit dem Rotor drehen, werden stärker reflektiert und transmittiert als positive Ordnungen (siehe auch Abb. 5). Dieses Verhalten wird in der Modellierung erst bei höheren Frequenzen, jedoch deutlich weniger stark ausgeprägt als in den Messdaten, wiedergegeben.

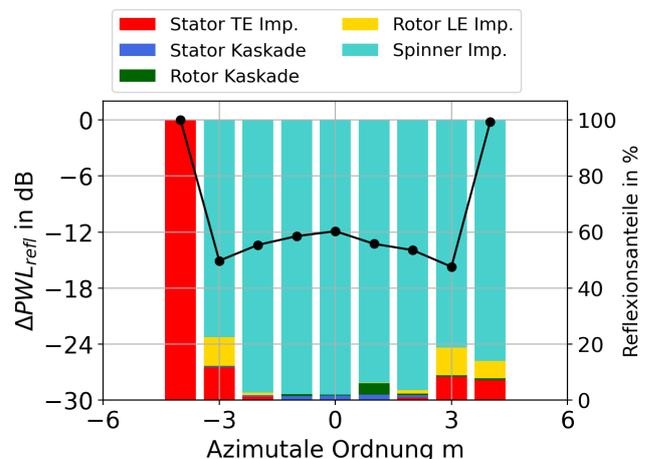


Abbildung 4: Relative Reflexionsanteile aus den Teilmodellen für Betriebspunkt 2250 rpm, $\phi = 0.28$, 1230 Hz, $n = 0$

Die relativen Reflexionsanteile aus den Teilmodellen an

der Gesamtreflexion sind Abbildung 4 zu entnehmen. Zu erkennen ist, dass der Einfluss des Spinners das Reflexionsverhalten dominiert.

Der Einfluss der Strömungsänderung an den Impedanzsprüngen an Rotor-Vorder- und Stator-Hinterkante ist vor allem für Moden nahe ihrer Cut-Off-Grenze relevant und zeigt für diese dieselbe Asymmetrie wie die Messdaten. Dies ist auf den Drall im Interstage-Bereich und die damit einhergehende verbesserte Ausbreitungsfähigkeit von Moden positiver azimuthaler Ordnung zurückzuführen. Die Asymmetrie ist im Verlauf des gesamten Reflexionsgrads jedoch kaum erkenntlich, da der dominante Spinner einen nahezu symmetrischen Verlauf der Reflexion erzeugt.

Entgegen der intuitiven Erwartung üben die Rotor- und Stator-Kaskaden an diesem Betriebspunkt nur einen geringen Einfluss auf die Reflexion aus.

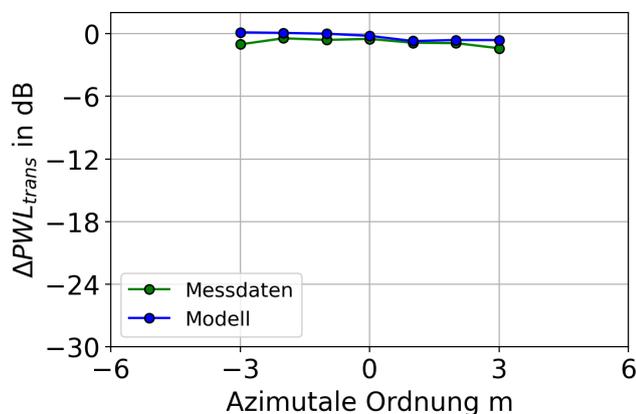


Abbildung 5: Transmissionsgrad über die azimuthale Ordnung für Betriebspunkt 2250 rpm, $\phi = 0.28$, 1230 Hz, $n = 0$

Im niedrigen Machzahlbereich sagt das Modell fast immer eine starke Transmission vorher (siehe exemplarisch Abb. 5), was für niedrige Frequenzen auch den Messergebnissen entspricht. Ein interessanter Effekt zeigt sich für die Mode $m = +4$. Diese ist aufgrund der geringeren mittleren Strömungsgeschwindigkeit im Einlass nicht ausbreitungsfähig, wird jedoch nur schwach in den Auslass reflektiert. Daher muss ein Teil ihrer Schallenergie zwischen Rotor und Stator gefangen bleiben. Dies liegt vermutlich daran, dass die Mode, da sie entgegen den Drall dreht, im Interstage-Bereich besser ausbreitungsfähig ist.

Mit steigender Frequenz, exemplarisch zu erkennen am Reflexionsgrad der Moden bei $f = 2926$ Hz und $n = 0$ in Abbildung 6, nehmen die Differenzen zwischen Modell und Experiment zu. Die glatten Kurven der Modellierung entsprechen nicht dem schwankenden Verlauf der Messdaten.

Im Gegensatz zu der zuvor betrachteten Frequenz werden Moden, die einen Cut-Off-Übergang durchlaufen, nicht totalreflektiert. Es treten nun aber Streuungen der Moden an Rotor und Stator in andere ausbreitungsfähige Modenordnungen auf, die zu signifikanten Effekten führen können. Zum Beispiel wird die Mode $m = -10$ am Stator in ihrer azimuthalen Ordnung gestreut.

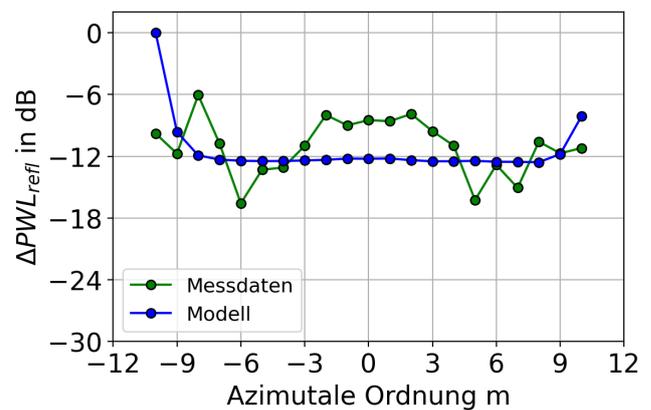


Abbildung 6: Reflexionsgrad über die azimuthale Ordnung für Betriebspunkt 2250 rpm, $\phi = 0.28$, 2926 Hz, $n = 0$

Für die $m = +10$ kommt Moden-Frequenz-Streuung am Rotor, teilweise gekoppelt mit anschließender Modenstreuung am Stator, vor. So können diese Moden weiter in den Interstage-Bereich bzw. Einlass übertragen werden.

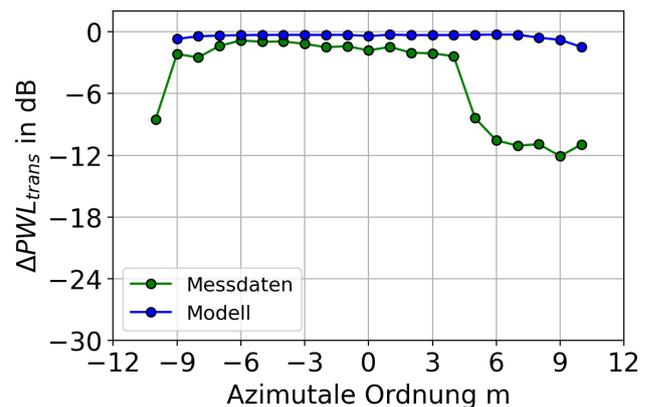


Abbildung 7: Transmissionsgrad über die azimuthale Ordnung für Betriebspunkt 2250 rpm, $\phi = 0.28$, 2926 Hz, $n = 0$

Diese Moden-Frequenz-Streueffekte verursachen vor allem im Verlauf des Transmissionsgrads starke Einbrüche, wie in Abbildung 7 zu erkennen. Die Einbrüche werden durch das Modell nicht abgebildet, sodass starke Differenzen auftreten. Die Mode $m = -10$ ist im Interstage-Bereich nicht ausbreitungsfähig, kann jedoch, da sie nahe ihrer Cut-On-Grenze ist, in geringem Maße in den Einlass transmittieren.

Modenstreuung

Aus dem Kaskadenmodell ergibt sich eine Kopplung der Modenstreuung und der Frequenzstreuung: Da der Rotor sowie der Drall in negative Richtung drehen, sind azimuthale und Frequenzstreuung entgegengesetzt.

Die in den Messdaten erfassten Streumoden folgen diesem Verhalten. Bei Streuung am Rotor wird die Frequenz einer Mode um das 18-fache der Rotor-Drehfrequenz erhöht und ihre azimuthale Ordnung um 18 verringert. Umgekehrt wird bei Streuung einer Mode in eine niedrigere Frequenz ihre azimuthale Ordnung um 18 erhöht. Überwiegend tritt jedoch Streuung in höhere Frequenzen

auf, was sich aus dem Cut-On-Bereich der Moden ergibt. In Abbildung 8 ist neben der direkten Reflexion auch ein Streugrad, berechnet gemäß

$$\Delta PWL_{Streu,refl} = PWL_{Streu-}^{+} - PWL_{Ziel-}^{-} \quad (6)$$

$\begin{matrix} + \\ mode, \\ Auslass \end{matrix}$
 $\begin{matrix} - \\ mode, \\ Auslass \end{matrix}$

für die exemplarisch gewählte Modenordnung $m = +8$ dargestellt. Hierbei wurden die einzelnen Streumoden jeder Frequenz energetisch summiert.

In den Messdaten ist deutlich, dass die Streukomponenten der Zielmoden positiver azimuthaler Ordnung in der Regel höhere Pegel aufweisen als die negativer azimuthaler Ordnung, was mit ihrer besseren Ausbreitungsfähigkeit aufgrund des Dralls im Interstage-Bereich zusammenhängen könnte. Am stärksten tritt Rotor-Stator-Streuung auf. Hier werden die Moden meist am Rotor in eine höhere Frequenz und niedrigere azimuthale Ordnung gestreut und stromab reflektiert. Anschließend wird ihre azimuthale Ordnung durch Streuung am Stator erhöht. Aufgrund der Cut-On-Bereiche tritt dies vor allem für Moden positiver azimuthaler Ordnungen auf. Streuung der azimuthalen Ordnung am Stator ohne vorherige Frequenzstreuung am Rotor ist erst bei der höchsten untersuchten Frequenz 3531 Hz für höhere azimuthale Ordnungen möglich und geht deshalb nicht in Abbildung 8 ein.

In dieser Abbildung ist zu erkennen, dass die Schallleistungspegel der Streumoden durch die Modellierung deutlich unterschätzt werden. Eine Vermutung ist, dass dies an der Annahme der gebogenen Schaufeln als flache Platten und der Vernachlässigung der Strömungsumlenkung liegt.

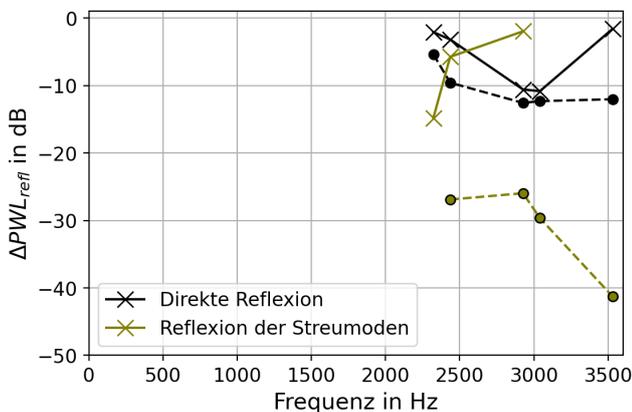


Abbildung 8: Vergleich des Reflexions- und Streugrads über die Frequenz aus Experiment (durchgezogene Linie) und Modell (gestrichelte Linie) für $m = +8$, $n = 0$ bei Betriebspunkt 2250 rpm, $\phi = 0.28$. Einzelne Streumoden werden für jede Frequenz energetisch zusammengefasst.

Zusammenfassung

Ein analytisches Modell zur Beschreibung der Transmission, Reflexion und Streuung von Schall an einer Fanstufe wurde anhand von Messdaten umfassend bewertet. Aus dieser Studie wurden exemplarische Ausschnitte vorgestellt. Das Transmissionsmodell besteht aus einer Kombination von drei Teilmodellen, die den Einfluss der Schaufeln, der Strömungsumlenkung durch die Schaufeln und der Kanalquerschnittsänderung durch den Spinner erfassen.

Das Modell eignet sich gut zur Auswertung der direkten Transmission und Reflexion bis zu Frequenzen von 2.5 kHz, darüber hinaus ergeben sich größere Abweichungen. Modenstreuung wird durch das Modell nicht korrekt abgebildet. Die Ursachen für die gezeigten Abweichungen werden in nachfolgenden Studien untersucht und das Weiterentwicklungspotenzial des Transmissionsmodells bewertet.

Literatur

- [1] M. Behn, U. Tapken: Experimental investigation of mode-frequency scattering at fan stages, eingereicht für ASME Turbo Expo 2023.
- [2] Tapken, Caldas, Meyer, Klähn, Rudolphi, Behn, Jaron, Enghardt: Fan test rig for detailed investigation of noise generation mechanisms due to inflow disturbances, AIAA 2021-2314. AIAA AVIATION 2021 FORUM, 2021.
- [3] S. N. Smith: Discrete Frequency Sound Generation in Axial Flow Turbomachines, Aeronautical Research Council Reports and Memoranda, 1972.
- [4] P. Puttkammer: Theory and application of an analytical approach for the determination of the transmission of sound waves through a stator, University of Twente & Engine Acoustics Dept. DLR, 2015.
- [5] L. Klähn: Experimentelle Untersuchung der Ausbreitung akustischer Moden durch Statorschaufelreihen und Gegenüberstellung mit einem analytischen Modell, Bachelorarbeit, Engine Acoustics Dept. DLR, 2017.
- [6] D. B. Hanson: Acoustic Reflection and Transmission of 2-Dimensional Rotors and Stators, Including Mode and Frequency Scattering Effects Including Mode and Frequency Scattering Effects, Research Report NASA / CR-1999-208880. Glenn Research Center: NASA, 1999.
- [7] S.W. Rienstra: Sound transmission in slowly varying circular and annular lined ducts with flow, Journal of Fluid Mechanics, 380:279–296, 1999.
- [8] Behn, Tapken, Puttkammer, Hagmeijer, Thoualt: Comparative study of different analytical approaches for modelling the transmission of sound waves through turbomachinery stators, 22nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, AIAA 2016-2927, 2016.